

# Medidas e Simulações da Seção Reta Radar de Objetos com Geometrias Simples e Complexas nas Bandas C e X

Mauro A. Alves<sup>1</sup>, Inácio M. Martins<sup>2,3</sup>, Marcelo A. S. Miacci<sup>2</sup>, Mirabel C. Rezende<sup>1</sup> e Milton F. Viegas Jr.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Materiais, São José dos Campos, SP; <sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP;

<sup>3</sup>Universidade de Taubaté, Taubaté, SP.

**Resumo** — Medidas de Seção Reta Radar (RCS) nas bandas C (6 GHz) e X (10 GHz) de objetos metálicos com geometria simples e complexas foram realizadas em uma câmara anecóica. As medidas experimentais foram comparadas a simulações de RCS dos mesmos objetos efetuadas com um software comercial. A comparação de resultados experimentais com as simulações mostra que, de forma geral, houve boa concordância entre eles. Porém, a existência de pequenas diferenças entre os dois tipos de resultados sugere que ambos os métodos devem ser usados simultaneamente no estudo da RCS de objetos complexos.

**Palavras-chaves** — Modelo, seção reta radar, radar, medidas, simulações.

## I. INTRODUÇÃO

A determinação da seção reta radar (RCS) de um objeto é uma tarefa complexa, apesar dos fundamentos que descrevem este tipo de fenômeno serem conhecidos há muito tempo [1]. Soluções analíticas para o cálculo da RCS existem apenas para objetos com geometrias simples [2]. Para um alvo real, a RCS pode ser determinada apenas através de medidas experimentais ou simulações numéricas. Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens. Por exemplo, simulações numéricas podem mostrar áreas de alta e baixa refletividade na superfície de um objeto; porém, simulações produzem resultados confiáveis apenas quando um modelo extremamente detalhado do objeto é usado nas simulações, o que implica em um alto custo computacional. Medidas de RCS efetuadas em câmaras anecóicas ou em campo aberto podem ser muito precisas. Mas existem muito fatores que podem interferir com as medidas (ruído instrumental, reflexões espúrias, etc.); mais ainda, os resultados são apresentados como valores numéricos representando o valor de RCS do objeto todo, medidos a um certo ângulo de aspecto. Neste caso, é difícil extrair, dos resultados, informações a respeito, por exemplo, da existência de áreas de alta refletividade na superfície do objeto. Quando se está interessado na redução ou aumento da RCS de um objeto, as dificuldades ao se usar o método experimental de determinação da RCS são ampliadas, pois não é possível determinar previamente como mudanças na superfície de um

objeto podem alterar a RCS. Este estudo foi realizado para mostrar que mesmo em casos em que medidas e simulações são executadas de maneira cuidadosa, ainda assim diferenças vão existir, o que sugere que os dois métodos devem ser usados simultaneamente quando a RCS de um objeto necessita ser determinada com alto grau de precisão.

## II. SEÇÃO RETA RADAR

A seção reta radar de um objeto é a medida da capacidade deste objeto de retornar potência em uma direção, normalizada com relação à densidade de potência da onda eletromagnética incidente [3]. A RCS pode ser definida como:

$$\sigma = 4\pi \frac{P_s}{P_i}, \quad (1)$$

onde  $P_s$  e  $P_i$  são a potência espalhada na direção do radar e a potência incidente no objeto, respectivamente. A RCS depende de fatores tais como a forma e características intrínsecas do objeto, a frequência do radar, ângulo de incidência, polarização da onda, etc. A solução de (1) é um problema complexo e requer a solução das Equações de Maxwell com condições de contorno muito complicadas. Equação (1) assume que a onda incidente sobre o objeto é plana. Esta condição é satisfeita quando o objeto está localizado no campo distante da antena. Esta distância é dada por:

$$r = \frac{2d^2}{\lambda}, \quad (2)$$

onde  $d$  é a maior dimensão do objeto e  $\lambda$  é o comprimento de onda do radar [2].

## II. PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental deste trabalho foi realizada na câmara anecóica do Instituto de Fomento Industrial (IFI/CTA, São José dos Campos). As medidas de RCS foram efetuadas nas bandas C (6 GHz) e X (10 GHz) com dois tipos de antenas. Em ambas a frequências, o radar operou em uma configuração quase-monoestática e polarização vertical. Para a coleta de dados na banda C, foi usado um par de antenas tipo corneta, modelo ANSAT 1.8 (Avibrás), com ganho de

M. A. Alves, mauro@sepn.org, Tel. +55-12-39221287, I. M. Martin, martin@ita.cta.br, Tel +55-12-3947-5937; M. A. S. Miacci, marcelomiacci@uol.com.br, M. C. Rezende, mirabel@iae.cta.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (Proj. Nos. 471931/03-9, 301583/06-3 e 307455/06-8), FAPESP (Proj. No. 03/00716-4), e pelo Ministério da Defesa.

aproximadamente 17 dBi. Para medidas na banda X, foram usadas antenas tipo corneta, modelo M2SAT-10 (M2SAT), com ganho de aproximadamente 10 dBi. Os dois tipos de antenas apresentam alto desempenho, padrão de radiação simétrico e baixa radiação nos lobos secundários. As antenas foram construídas de tal forma que o acoplamento entre elas é minimizado. Na câmara anecóica, a distância entre antenas e o alvo foi de 6,5 m, aproximadamente.

Um gerador CW sintetizado HP8360B foi utilizado como fonte de radiação microondas, e o analisador espectral HP8593E como o coletor de sinais. No caso das medidas em banda C, foi utilizado um sistema supressor de ruídos [3].

O sistema de medidas foi calibrado através de placas de alumínio medindo 0,2 x 0,2 m e 0,3 x 0,3 m. Dois alvos metálicos foram usados para medidas na banda C, Fig. 1. O primeiro alvo, um míssil hipotético, consistiu de um cilindro de alumínio com comprimento de 0,32 m e diâmetro de 0,15 m. Quatro placas de alumínio de alumínio, 0,15 x 0,15 m, foram colocadas ao redor, perpendicularmente ao eixo do cilindro. O segundo alvo é parte da frente de um míssil Piranha desativado (MAA-1 Piranha, Mectron), Fig. 2; o corpo e as aletas do míssil são feitas de alumínio. O comprimento total da seção do míssil é 0,72 m. Para uma frequência de 6,0 GHz, o míssil hipotético e a seção do míssil correspondem a  $6,4\lambda$  e  $14,4\lambda$ , respectivamente.



Fig.1 Míssil hipotético (acima) e seção de um míssil (abaixo).  
As figuras não estão em escala.



Fig. 2 Aeronave hipotética.

Para as medidas na banda X, foi usado o modelo de uma aeronave hipotética construída em acrílico e revestida por papel-alumínio, Fig 2. A espessura do papel-alumínio é da ordem de 0,1mm, mais espessa do que a “skin depth” do alumínio para frequências da banda X ( $\delta \approx 1 \mu\text{m}$ ). O comprimento e envergadura do modelo são 0,52 m e 0,53 m, respectivamente. Para a frequência de 10 GHz o comprimento do modelo é de  $17,3\lambda$ .

### III. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O software comercial FEKO [4] foi utilizado para realizar as simulações de RCS dos alvos. FEKO emprega o método rápido de multipolos multiníveis (Multilevel Fast Multipole Method, MLFMM) [5], o que é uma alternativa ao método dos momentos, mais comumente utilizado para resolver problemas de espalhamento eletromagnético.

Modelos geométricos dos alvos usados nas medidas experimentais foram criados com o software Rhinoceros e importados para o software FEKO, onde um triangulador Delaunay gerou automaticamente as malhas de elementos triangulares das superfícies dos modelos. Os modelos usados nas simulações estão mostrados nas Fig. 3.

As superfícies do míssil hipotético, da seção do míssil Piranha e da aeronave hipotética foram discretizadas em 22.256, 47.971 e 27.708 elementos triangulares, respectivamente.

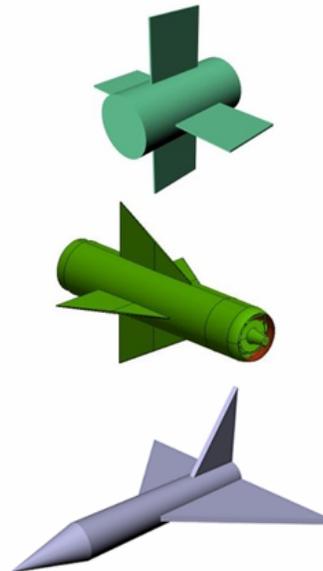


Fig. 3 Modelos geométricos utilizados nas simulações de RCS.  
As figuras não estão em escala

### IV. RESULTADOS

Para a obtenção dos valores experimentais e simulados de RCS, os alvos foram girados com relação a eixo perpendicular ao eixo principal dos objetos. Medidas experimentais de RCS na banda C foram obtidas a intervalos de  $0,5^\circ$ ; na banda X este intervalo foi de  $0,75^\circ$ . Os valores simulados de RCS foram obtidos a intervalos de  $1,0^\circ$  C. Nas

medidas experimentais os alvos foram girados  $360^\circ$  e nas simulações, devido à simetria dos modelos, a rotação foi de  $180^\circ$ . O tempo de simulação variou de 24 a 90 h. Devido à distância alvo-antena, a condição de campo distante (2) não é completamente satisfeita. Neste caso, no lugar de uma onda plana, os objetos foram iluminados por um padrão de radiação produzido por uma fonte pontual localizado a uma distância finita. Este procedimento requer muito mais recursos computacionais do que o uso de uma onda plana.

#### A. Medidas e Simulações a 6 GHz

Figs. 4 e 5 mostram a comparação entre os valores experimentais e simulados de RCS para o míssil hipotético e para a seção do míssil a 6 GHz. Para os dois objetos, nota-se que existe boa concordância entre as medidas experimentais e simulações, principalmente para ângulos de aspecto entre  $60^\circ$  e  $120^\circ$ , porém uma inspeção detalhada mostra que para valores de ângulo de aspecto de  $15^\circ$  a  $60^\circ$  e de  $120^\circ$  a  $165^\circ$  o padrão de RCS é assimétrico. Esta assimetria pode resultar de irregularidades nas superfícies dos alvos reais ou desalinhamento dos alvos com relação à antena.

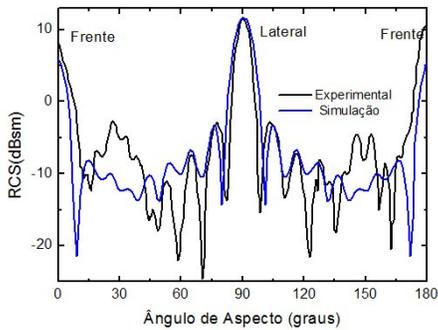


Fig. 4 Valores medidos e simulados de RCS do míssil hipotético a 6 GHz.

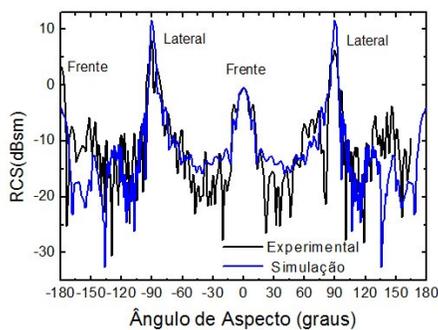


Fig. 5 Valores medidos e simulados de RCS da seção do míssil Piranha a 6 GHz

Figs. 6 e 7 mostram alguns dos resultados das simulações de correntes elétricas induzidas nas superfícies dos objetos pela onda de radar. Note que dependendo do ângulo entre a superfície do objeto e a direção da onda de radar diferentes partes do objeto refletem as ondas de radar de maneira diferente. Em vermelho estão indicadas as áreas de alta refletividade, e em azul, as de baixa intensidade.

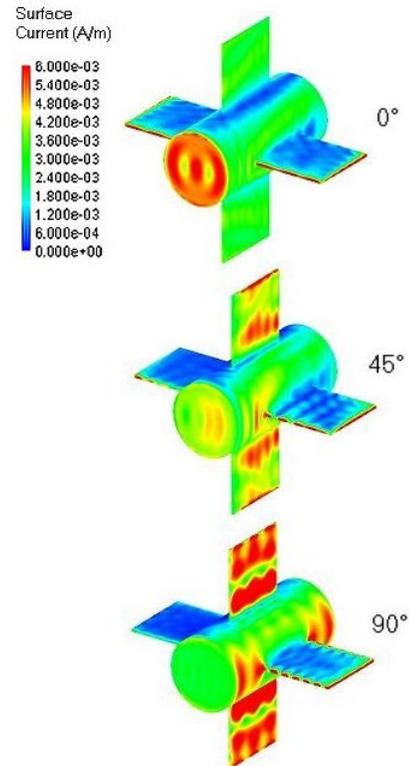


Fig. 6 Correntes superficiais na superfície do míssil hipotético. A orientação da superfície do objeto com relação à direção das ondas de radar ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ) está indicada na figura.

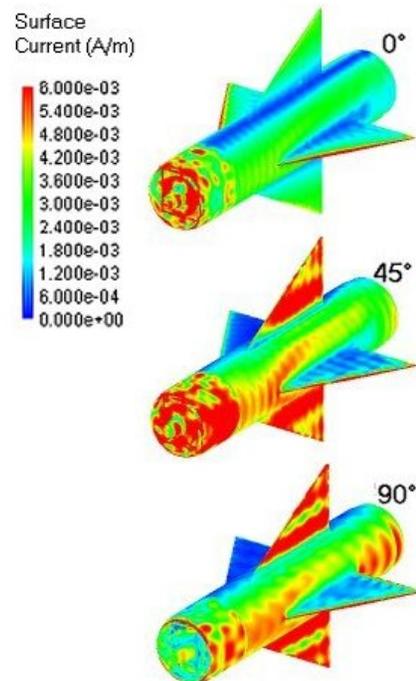


Fig. 7 Correntes superficiais na superfície da seção do míssil. A orientação da superfície do objeto com relação à direção das ondas de radar ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ ) está indicada na figura.

## B. Medidas e Simulações a 10 GHz

A Figura 8 mostra a comparação entre os valores experimentais e simulados de RCS para a aeronave hipotética a 10 GHz.

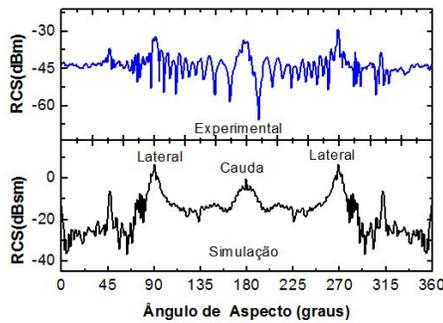


Fig. 8. Valores medidos e simulados de RCS da aeronave hipotética a 10 GHz.

Embora os picos de refletividade produzidos pelas laterais e pela cauda da aeronave sejam similares, percebe-se que os padrões de RCS apresentam diferenças significativas. Note também que o padrão de RCS experimental não é simétrico. Vários fatores podem explicar essas diferenças, e talvez o mais importante seja o fato da superfície do modelo experimental não ser lisa, como a do modelo geométrico. O papel alumínio aplicado à superfície do modelo possuía um alto grau de rugosidade, o que criou um grande número de superfícies espalhadoras; essas irregularidades também podem alterar a distribuição de correntes superficiais, e padrões de difração de borda, por exemplo.

Na Fig. 9 são mostrados alguns resultados das simulações de correntes elétricas produzidas na superfície da aeronave hipotética.

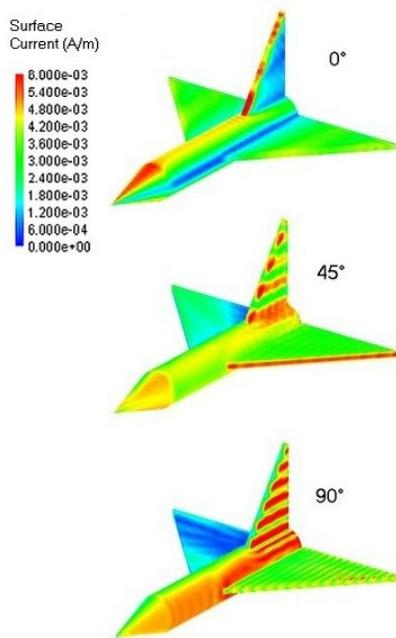


Fig. 9 Correntes superficiais na superfície da aeronave hipotética. A orientação da superfície do objeto com relação à direção das ondas de radar (0°, 45° e 90°) está indicada na figura.

## V. CONCLUSÃO

O estudo de problemas de espalhamento eletromagnético e, em especial, do cálculo da RCS e objetos com geometrias complexas é extremamente complicado. Neste trabalho, a RCS de três diferentes objetos foi medida experimentalmente em uma câmara anecóica e calculada através de simulações numéricas. Apesar do grande cuidado que se teve, tanto na realização das medidas experimentais como das simulações, foi observado que existiram diferenças, às vezes bastante significativas entre estes dois tipos de resultados. Simulações numéricas podem ser bastante demoradas e exigir muito em termos de recursos computacionais, porém permitem visualização do fenômeno com alto detalhamento. Medidas em câmaras anecóicas, por outro lado podem ser bastante precisas. As diferenças entre resultados e as características próprias dos métodos servem para mostrar que, em uma situação ideal, os dois métodos deveriam ser utilizados para caracterizar de maneira completa a RCS de um objeto.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. S. Swords, *Technical History of the Beginnings of Radar*, London: Institute of Electrical Engineers, 1986, 338p.
- [2] E. F. Knott, J. F. Schaeffer and M. T. Tuley, *Radar Cross Section Measurements*, Norwood: Artech House Inc., 1993, 546p.
- [3] M. A. S. Miacci, I. M. Martin and M. C. Rezende., "Implementation of an active noise suppression system in C-band indoor RCS measurements," in *Proceedings of Microwave and Optoelectronics Conference*, Salvador, Brazil, pp. 396-400, November 2007.
- [4] FEKO, EM Software & Systems, Available: <http://www.feko.info>, Accessed 15 February 2008.
- [5] R. Coifman, V. Rokhlin and V. Wandurza, "The fast multipole method for the wave equation: A pedestrian prescription," *IEE Antennas and Propagation Magazine*. vol. 35 (3), 7-12, 1993.